[7] 室内音響の理論と実際

平田能睦 HIRATA Yoshimutsu

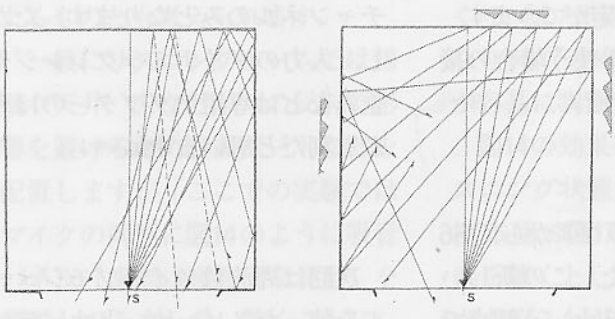
幾何音響学（GA）と波動音響学（WA）の特徴と相違を述べ，GAとWAを組み合わせたGWAによって，室形および吸音材配置が室内の音の減衰にどのように影響するのか，実際的な例をあげて説明します．

「音は見えないのでわかりにくい」，そうかもしれません．では，音が見えたらどうなるのでしょうか．室内を飛び交う音の複雑さでもっとわからなくなるでしょう．やはり，音は見えないほうがよいのです．「賢い者の目は頭の中にある」ということわざを聞いたことがあるでしょうか．この目を使い，音がどのように動き回るか見ることにしましょう．

音は光のように進む

音は光のように真っ直ぐ進み，光のように壁で反射するとして，音の伝わり方や散乱について考えるのが幾何音響学（GA）です．スピーカーから出た音が，壁で反射しながら部屋全体に拡がるようすは2次元であるなら部屋の図面と定規と鉛筆があれば描けます．

スピーカーから放射状に線を伸ばし，壁に達したら光のように入射角と反射角を等しくして線を折り返します．この繰り返しをスピーカーから伸ばしたすべての線について行います．スピーカーから伸びた線の長さは，音が出た時点からの時間に比例した量になります．コンサートホールの音響設計では，実際にこのような方法で，初期反射音が有害なエコーとしてステージに戻ってこないかどうかを調べます．こうして描いたのが音線図です．



[図1] 音は光のように進むものとして，音線図を描いてホールの壁の形を設計する．ステージに戻ってくる有害なエコー（左）は，折り壁にすることにより客席へ散乱できる（右）

さて，この音線図をさらに描き進めていくと図面は無数の線で埋まり，ついには真っ黒になってしまいます．スピーカーから音を出すと，コンサートホールなら1，2秒，リスニングルームなら0.2秒か0.3秒で音は部屋全体に拡がります．これは音線図が真っ黒になった状態です．

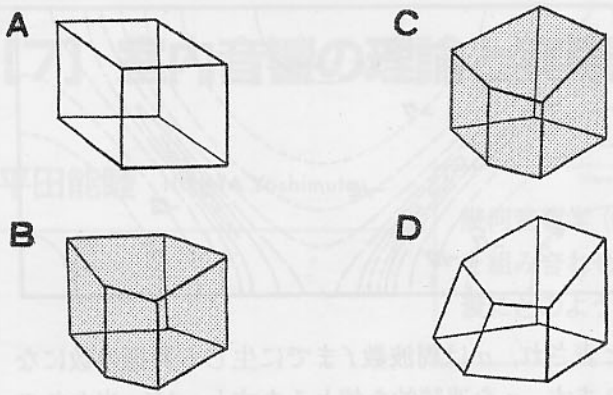
黒くなった音線図の見えない線は意味がありません．頭を切り換え，線を1本1本見るのはやめて，図面を埋める線の密度を見ます．図面が黒くなっていくようすに注目すると，何がわかるでしょうか．部屋が大きいほど黒くなるまでの時間がかかります．丸や四角の部屋だといつまでたっても黒く埋まらない場所があります．不整形な部屋であればスピーカーから伸ばした1本の線でもやがて全面が一様に黒くなります．

スピーカーから伸ばした線を最初の部分から消していくと，消しゴムが必要になりますが，音を止めたときの音線図になります．図面が白から黒くなったように，今度は黒から白くなります．これは残響を表します．部屋全体に拡がっていた音が消えていく時間を耳と時計で測ったのがセイビンです．部屋の容積をV〔m^3〕，部屋の天井，壁，床の総表面積をS〔m^2〕，平均吸音率を$\bar{\alpha}$とすると，残響時間Tを与えるセイビンの式は，

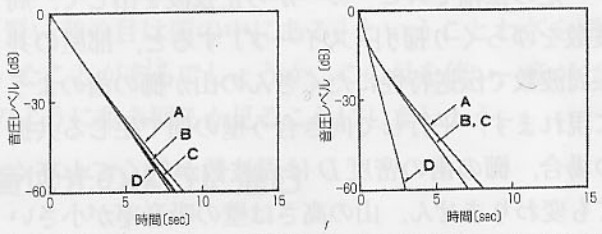
$$T = 0.16V/\bar{\alpha}S \text{〔sec〕}$$

となります．部屋の容積が大きいほど残響時間は長くなり，部屋から漏れ出る音の量や壁面で吸収される音の量が多いほど残響時間は短くなります．

部屋の形や吸音材の配置は残響にどんな影響を与えるのでしょうか．セイビンの式はこの問いに対して何の答えも与えてくれません．それでセイビンの式を頼りとする音響設計の目標の一つは，その式の条件を満たすように部屋をなるべく不整形にすることでした．



[図 3] 室形を４つのタイプに分類すると，A は WA（波動音響学），D は GA（幾何音響学）で扱うことができるが，A と D の中間の半整形室 B と C は GWA（幾何・波動音響学）でなければ扱うことができない



[図 4] GWA によって計算した４つの室形 A，B，C，D での音の減衰曲線．左は空室，右は床にカーペットを敷いた場合

表せるか調べてみると，驚いたことに鏡像法を使って解析した結果はモースとボルトによる結果と一致しました．GA と WA は解析方法がまったく異なりますが，両者の解析が同じ結果に到達したことから，GA と WA を結び合わせて不整形から直方体までのさまざまな部屋の音場を理論的に扱えるようになりました．

波動方程式はとっつきにくく，物理的な意味がわかりにくいことがありますが，鏡像法は感覚的に捉えられるやさしさがあります．とはいえ，鏡像を描くだけでは直方体の部屋の音場は解析できません．GA で欠けている周波数はどこに出てくるのでしょうか．画像の解像度と周波数の関係を考えると理解できます．波長の長い低い周波数ほど鏡像は大きく拡がります．このボケの大きさを波長 λ で表し，式に組み入れます．このようにして空間に並んだ無数の鏡像を周波数に応じた分け方で整理すると，１次元的配列，２次元的配列，３次元的配列に分類される３つの鏡像グループが求まります．これら３つの鏡像グループで与えられる矩形室内の音の強さと音の減衰は WA の３種類の波動で与えられたものと完全に対応します．

GA と WA を組み合わせた GWA．このハイブリッドの解析によって明らかになった事柄を取り上げましょう．

部屋の形と音の減衰曲線

壁の材料は変えずに部屋の形を整形から不整形へ変化させたときの室内の音の減衰曲線（対数減衰特性）を GWA で計算します．

室形は，A：整形（立方体），B：天井および床に垂直な互いに平行しない側壁を特徴とする半整形，C：室形 B の天井を傾斜させたもの，D：不整形，以上の４つ（図３）です．部屋の容積は 200m^3，コンクリート造りで吸音率を 0.02（500Hz）とします．室形 C と D は残響室の典型的な例です．

４つの室形の違いは空室では目立ちません．残響時間（音が－60dB に減衰するまでの時間）は 7.8 秒で A が少し長くなっています（図４）．しかし，床に薄手のカーペット（吸音率 0.2，500Hz）を敷くと，室形の違いは顕著になります．不整形な D の音の減衰は直線であるのに対して，ほかの室形では－10dB ほどのところから折れ曲がっています．

さまざまな材料の吸音率を測定するために残響室が用いられます．空室と材料を入れたときの残響時間を測定して吸音率を算出しますが，音の減衰曲線が折れ曲がると，正確な吸音率を求められません．計測用の残響室であれば，その室形は建設費はかかるが不整形が良いということになります．

部屋の形と吸音材の配置

不整形な部屋なら吸音材をどこに置いても音の減衰曲線は変わりません．ところが整形と半整形の場合は吸音材の配置によって室内の音の減衰の仕方が変わります．コンサートホールなら室形で音の響きが変わることになります．

室形 B を例に取り，床にカーペットを置いた場合とこれを３等分して壁と床に２対１の比率で配置した場合（図５）の音の減衰を GWA で計算してみます．音の減衰曲線は床だけにカーペットを置いた場合は折れ曲がりますが，床と壁に配置すると不整形の部屋で測定したように直線になります．

GWA で示されたこの結果について，BBC（英国放送協会）の研究所から次のようなコメントが寄せられました．「当研究所の残響室は B の室形で，長年にわたりカーペットなどは壁と床に面積比３対１に分割して配置して吸音率の測定を行っている．……その経緯は不明だが，この比率は示された理論